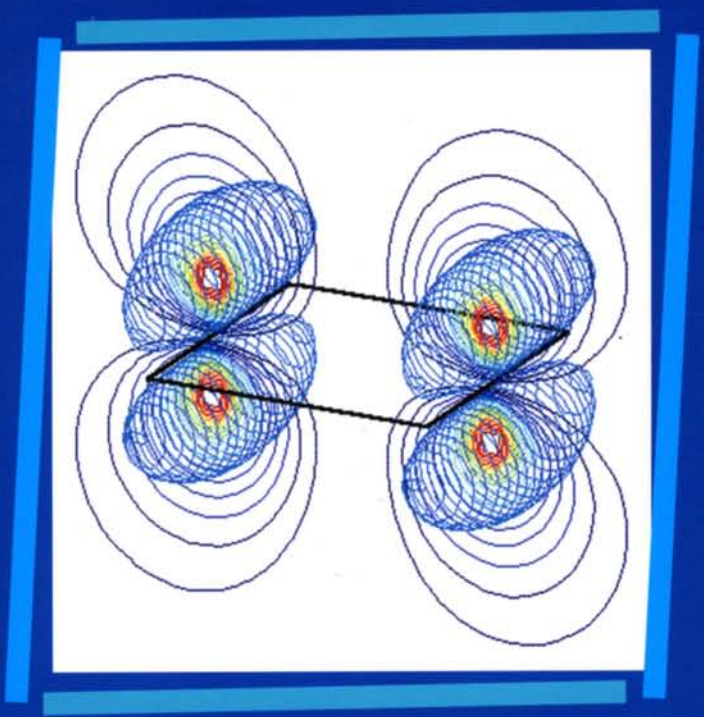
# Rayonnement électromagnétique des convertisseurs à découpage

*Approche simplifiée par le concept des îlots rayonnants*

J.-L. COCQUERELLE, C. PASQUIER

Préface de J. SAILLARD



EDP SCIENCES

Extrait de la publication

# Rayonnement électromagnétique des convertisseurs à découpage

## Approche simplifiée par le concept des îlots rayonnants

**Jean-Louis Cocquerelle**
Docteur ès Sciences Physiques
Professeur des universités

**Christophe Pasquier**
Docteur de l'université de Nantes

*Laboratoire de recherches en électronique de puissance et C.E.M.*
*EPUN (École Polytechnique de l'université de Nantes)*

EDP SCIENCES

17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Extrait de la publication

ISBN : 2-86883-560-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2002

Extrait de la publication

# Préface

Le rayonnement électromagnétique des dispositifs électroniques modernes est une préoccupation majeure des concepteurs et utilisateurs, soucieux de respecter les règles de la compatibilité électromagnétique.

Les mesures directes, bien que parfois délicates, ne présentent pas de problèmes insurmontables pour les laboratoires compétents au sens de la directive CEM. La difficulté concerne en réalité, les études de nature prédictive, qu'il conviendrait de conduire par simulation avant même le routage des cartes. Les circuits analogiques utilisés en traitement de signal, seraient alors examinés principalement dans le contexte de l'immunité ou de la vulnérabilité, alors que les cartes numériques et les cartes de puissance à découpage H.F., le seraient principalement sur le plan de l'émission, respectivement en champ électrique et magnétique.

Ces études sont difficiles et ne sont actuellement développées que par quelques laboratoires de recherche. Elles nécessitent des moyens informatiques puissants et un investissement de temps considérable.

J.L. Cocquerelle et C. Pasquier, dans le cadre du présent ouvrage, présentent une version didactique, donc accessible sur le plan pédagogique, des résultats de travaux de recherche autorisant une approche simplifiée du rayonnement des cartes de puissance à découpage. Ils ont en effet créé dans ce but un concept original, celui des « îlots rayonnants », qui correspondent sur une carte électronique à des zones émettrices de champ magnétique à contribution prépondérante.

Un support informatique est joint au livre, il contient un grand nombre de représentations graphiques très pertinentes permettant la meilleure compréhension possible au lecteur.

Je tenais, en préfaçant cet ouvrage, à souligner l'effort que ces deux chercheurs de l'université de Nantes ont entrepris pour assurer le transfert vers la pédagogie, de travaux de recherche dans un domaine édicté et soutenu par l'évolution des technologies en électronique.

Joseph SAILLARD

Vice-Président du Conseil Scientifique de l'Université de Nantes
Chargé de la Recherche

Extrait de la publication

# Note des auteurs

L'évolution des technologies en électronique permet de réaliser des convertisseurs de puissance à fréquence de découpage de plus en plus élevée. L'étude des champs émis par de telles structures devient donc une obligation pour le concepteur soucieux d'éviter la pollution électromagnétique de l'environnement proche et lointain.

Cet ouvrage résulte de travaux de recherche théorique et appliquée, que nous avons conduits dans cette perspective, au laboratoire d'électronique de puissance et de compatibilité électromagnétique (LEPCEM), de l'école polytechnique de l'Université de Nantes.

La représentation des champs, dans un livre, simplement réalisé en monochrome, est forcément réductrice en qualité graphique. Nous avons donc conçu un support informatique, permettant de visualiser en couleurs et avec une meilleure définition, la majorité des illustrations du livre ainsi que de nombreuses autres venant en complément.

Le mode d'emploi est très simple :

- L'icône « 💻$_x$ », portée à droite d'une illustration du livre, indique que celle-ci est reprise sur le support informatique à la page x de celui-ci ;
- L'icône « 💻CDx-y », portée à gauche dans le texte suivant une illustration du livre, indique que des représentations complémentaires sont disponibles sur le support informatique de la page x à la page y ;
- L'icône « 🕮 Page x », portée en bas et à droite d'une illustration du support informatique, indique que celle-ci est présente ou annoncée, dans le livre à la page x.

Extrait de la publication

# Table des matières

Introduction ..... 1

Chapitre I : Aspects essentiels de l'électronique de puissance ..... 5

I.1 La commutation en électronique de puissance ..... 5
I.1.1 Principes fondamentaux ..... 5
I.1.2 Commutation dure ..... 6
I.1.3 Commutation douce ..... 6
I.1.4 Commutation adoucie ..... 6

I.2 Convertisseurs et composants associés ..... 7
I.2.1 Convertisseurs à la fréquence réseau ..... 7
I.2.2 Convertisseurs à fréquence industrielle (< 16 kHz) ..... 8
I.2.2.1 Les hacheurs de puissance ..... 8
I.2.2.2 Les onduleurs ..... 8
I.2.3 Convertisseurs à fréquence élevée (30k Hz - 100 kHz) ..... 9
I.2.4 Caractéristiques des SC de puissance associés aux convertisseurs ..... 9
I.2.4.1 Le thyristor ou SCR ..... 10
I.2.4.2 Le thyristor GTO ..... 11
I.2.4.3 Le MCT ..... 12
I.2.4.4 L'IGBT ..... 13
I.2.4.5 Le transistor MOS de puissance ..... 14
I.2.4.6 Le transistor bipolaire de puissance ..... 15
I.2.4.7 Le triac ..... 16
I.2.5 Comparatif et bilan ..... 17

I.3 Formes d'ondes des courants et modèles simplifiés correspondants ..... 18
I.3.1 Impulsions très brèves de courant d'un pont à sortie 3 niveaux ..... 18
I.3.2 Oscillations de courant en amont ou aval d'un hacheur rapide ..... 21
I.3.3 Ondes de base dans les domaines temporel et fréquentiel ..... 22
I.3.3.1 Onde rectangulaire ..... 23
I.3.3.2 Onde trapézoïdale symétrique ..... 24
I.3.3.3 Onde trapézoïdale asymétrique ..... 26
I.3.4 Prise en compte des oscillations de commutation ..... 27

Chapitre II : Présentation simplifiée du rayonnement des cartes de puissance ..... 33

II.1 Îlot rayonnant, boucle « topologique » et boucle « équivalente » ..... 33
II.1.1 « Îlot rayonnant » ..... 33
II.1.2 « Boucle topologique » ..... 33
II.1.3 « Boucle équivalente » ..... 35

II.2 Formulation mathématique et représentation spatiale du champ magnétique ..... 35
II.2.1 Equations électromagnétiques ..... 35
II.2.2 Application à la boucle élémentaire ..... 39
II.2.2.1 Formulation mathématique ..... 39
II.2.2.2 Représentations spatiales ..... 41
II.2.3 Application à la boucle rectangulaire ..... 44

Extrait de la publication

II.2.3.1 Formulation mathématique ..... 44
II.2.3.2 Représentations spatiales ..... 50
II.2.4 Domaine de validité de l'équivalence « boucle réelle-boucle élémentaire » ..... 54
II.2.4.1 Première étude : comparaison directe ..... 55
II.2.4.2 Deuxième étude : variation de la taille de la boucle carrée ..... 55
II.2.4.3 Troisième étude : variation des dimensions à surface fixée ..... 60
II.2.4.4 Quatrième étude : troncature ..... 63
II.2.5 Limite de validité des équations simplifiées dans l'hypothèse du « champ proche » ..... 66
II.2.5.1 Présentation du paramètre βr ..... 66
II.2.5.2 Influence de βr sur l'évolution temporelle du champ ..... 68
II.2.5.3 Calcul du champ avec et sans simplification ..... 69
II.2.6 Influence d'un plan de masse éventuel ..... 72
II.2.7 Etude simplifiée de l'émission conjuguée de deux boucles ..... 73

Chapitre III : F.e.m. induite dans une boucle sensible et immunité ..... 79

III.1 Recherche et estimation de la f.e.m. induite ..... 80
III.1.1 Organigramme de la recherche de e(t) ..... 80
III.1.2 Blocs de calcul ..... 84
III.1.2.1 Bloc de calcul général ..... 84
III.1.2.2 Bloc de calcul avec l'hypothèse du champ uniforme ..... 85
III.1.2.3 Bloc de calcul avec les hypothèses du champ uniforme et du flux recueilli maximum ..... 86
III.1.2.4 Bloc de calcul avec le maximum de simplification ..... 86
III.1.2.5 Bloc de calcul basé sur la notion d'enveloppe ..... 86
III.1.3 Application des hypothèses et des méthodes ..... 87
III.1.3.1 Calcul général ..... 87
III.1.3.2 Hypothèse du champ uniforme ..... 90
III.1.3.3 Hypothèse du flux recueilli maximum ..... 92
III.1.3.4 Hypothèse de la boucle équivalente ..... 93
III.1.3.5 Méthode de l'enveloppe ..... 94
III.1.4 Comparaison des résultats obtenus ..... 97

III.2 Cartographie en situations typiques ..... 99
III.2.1 Cas des boucles parallèles ..... 99
III.2.1.1 Première position : $B_r$ est dans un plan parallèle au-dessus de $B_P$ ..... 100
III.2.1.2 Deuxième position : vues suivant une coupe parallèle au plan YZ ..... 101
III.2.1.3 Equipotentielles de la f.e.m. induite dans l'espace autour de $B_P$ ..... 101
III.2.2 Cas des boucles perpendiculaires ..... 103

III.3 Optimisation du positionnement de la boucle sensible ..... 107

Conclusion générale ..... 113

Bibliographie ..... 115

Extrait de la publication

# INTRODUCTION

Cet ouvrage s'inscrit dans les activités de compatibilité électromagnétique (CEM) du génie électrique. Il concerne principalement les convertisseurs de puissance à fréquence de découpage élevée, que l'on trouve par exemple dans les alimentations des micro-ordinateurs, celles des matériels audio-vidéo modernes, et tous les dispositifs électroniques de manière générale. Ces structures sont intrinsèquement génératrices de perturbations conduites et rayonnées, ces dernières pouvant altérer le fonctionnement de circuits sensibles proches dont, parfois, la carte de commande de la structure elle-même (autoperturbation).

Les études en CEM concernent généralement le rayonnement à une distance suffisante pour obtenir une onde plane et ne retenir alors que le champ électrique.

Plusieurs d'entre elles s'intéressent plus particulièrement aux convertisseurs de puissance et à la prédiction de leur rayonnement. Les méthodes numériques employées (méthode des moments, des éléments finis...) ont souvent pour objectif la modélisation d'ensemble du convertisseur autorisant l'obtention principalement du champ électrique global émis. Ces études sont complexes et s'adressent à un public averti.

Certains logiciels de CEM commercialisés, essentiellement destinés aux cartes numériques, permettent d'obtenir en 2D et parfois en 3D la cartographie du champ électrique résultant. Ces logiciels sont spécifiques et onéreux ; les moins coûteux d'entre eux procèdent parfois à des simplifications extrêmes basées sur l'estimation dans le « pire des cas » au sens des normes en CEM.

Si l'on se préoccupe du rayonnement électromagnétique dans l'environnement immédiat d'une carte électronique numérique, on sait que le champ électrique sera prépondérant car les circuits utilisés fonctionnent avec des temps de commutation très courts, (quelques ns) et les gradients de tension correspondants (dv/dt) peuvent excéder $10^9$ V/s, alors que les courants étant très faibles (unité courante : le µA) le champ magnétique proche est très réduit. S'il s'agit en revanche, d'une carte électronique de puissance à découpage, les temps de commutation sont rarement inférieurs à 100 ns, mais, dès lors que les courants mis en jeu se chiffrent en ampères, le champ magnétique devient important, et son évaluation est nécessaire.

Dans cette perspective, les auteurs de cet ouvrage ont mis à profit l'expérience pratique qu'ils ont acquise en laboratoire de tests en CEM concernant diverses cartes électroniques embarquées dans des convertisseurs de puissance à découpage. Cela leur a inspiré une démarche simplifiée particulière. En effet, au voisinage immédiat de telles cartes, le champ magnétique mesurable avec une sonde adaptée est prépondérant, et se situe en des endroits particuliers qu'ils considèrent comme des « îlots rayonnants ».

Ces « îlots » sont souvent repérables sur la sérigraphie du circuit imprimé correspondant. Les auteurs ont alors étudié la possibilité d'assimiler ces « îlots », au demeurant peu nombreux sur une carte standard, à de simples « boucles équivalentes ». Cette démarche apporte une simplification évidente accentuée par l'utilisation de calculs associés allégés ; elle peut sembler manquer de précision, mais apparaîtra plus pragmatique à la plupart des industriels concepteurs qui connaissent par expérience les « points chauds » de leur carte.

Les auteurs ont donc conduit avec précaution une étude spécifique sur le rayonnement magnétique des boucles de puissance devant permettre d'obtenir un outil d'évaluation et de représentation du champ magnétique accessible à tous.

Dès lors que le champ est connu en tout point de l'espace, il est possible de rechercher la force électromotrice qui pourrait être induite dans une boucle sensible de l'environnement immédiat du convertisseur. En général, le concepteur ne souhaite pas mettre en place de blindage ni d'écran et dispose, le plus souvent, d'un coffret non métallique. Un apport qui a semblé original aux auteurs de ce livre dans ces conditions, concerne la détermination de l'orientation optimale de cette boucle sensible pour minimiser directement l'amplitude de la f.e.m. induite.

Cela se traduit pour le concepteur de la façon suivante :

- s'il se fixe un point de l'espace environnant, il disposera rapidement, après simple repérage et spécification des « îlots », des données de positionnement et d'orientation d'une carte sensible éventuelle. La perturbation sera alors minimisée.
- s'il dispose de plusieurs emplacements disponibles à l'intérieur du coffret pour y fixer la carte sensible qu'il veut ajouter, il pourra obtenir une information sur les zones à retenir en priorité que nous appellerons par la suite « zones tranquilles ». Dans ces conditions, la f.e.m. induite dans une boucle victime sera déjà réduite, le choix d'une orientation optimale pouvant conduire jusqu'à pratiquement l'annulation.

Le but de cet ouvrage est donc double : proposer au lecteur une approche simple concernant l'analyse des phénomènes électromagnétiques et les calculs associés, et le sensibiliser aux implications industrielles pouvant en découler.



Extrait de la publication

# CHAPITRE I

## ASPECTS ESSENTIELS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Extrait de la publication

Extrait de la publication

Ce chapitre a pour but de présenter et de caractériser dans une démarche « CEM », les semi-conducteurs utilisés classiquement dans les convertisseurs de l'électronique de puissance.

L'objectif final est de déterminer les formes d'ondes types des courants qui pourront être à l'origine du rayonnement magnétique au sein d'un montage.

Avant tout il est donc nécessaire de rappeler l'essentiel sur la commutation.

## I.1 La commutation en électronique de puissance

Le fonctionnement des interrupteurs est déterminant au regard de l'importance des champs qui vont résulter de leur insertion dans un montage.

### I.1.1 Principes fondamentaux

Les convertisseurs de l'électronique de puissance sont présents dans la quasi-totalité des appareils et systèmes utilisant l'énergie électrique.

Leur rôle est de modifier la source électrique, c'est-à-dire le réseau distribué, soit alternatif, soit continu, pour satisfaire aux exigences édictées par la nature et les caractéristiques du récepteur. Les modifications peuvent concerner la nature même de la source (courant ou tension) ainsi qu'un ou plusieurs de ses paramètres, dont essentiellement : l'amplitude, la fréquence, le régime de mise à la terre, le débit maximum.

Le principe fondamental de l'électronique de puissance est de procéder à l'adaptation des sources uniquement par découpage temporel des tensions et courants, donc sans pertes appréciables d'énergie.

Les composants, qui assurent les découpages, présentent alors deux phases de fonctionnement importantes au regard de la CEM : les commutations à l'ouverture et à la fermeture. Suivant les semi-conducteurs utilisés et la structure du convertisseur considéré, différents types de commutations sont à considérer :

- concernant l'interrupteur, « la commutation » est le « mécanisme » physique d'ouverture ou de fermeture des semi-conducteurs constituant l'interrupteur. Elle est soit « commandée » c'est-à-dire provoquée par l'application d'un signal directement sur la commande du composant, soit « naturelle » ou « spontanée » si elle a lieu sans intervention extérieure. Dans ce dernier cas, elle résulte uniquement du passage par zéro de la tension appliquée au composant ou du courant qui le traverse ;
- pour un convertisseur, le mot commutation est relatif aux événements concernant les éléments de la structure directement associés aux interrupteurs qui peuvent être considérés non plus individuellement, mais assemblés dans des sous-ensembles appelés « cellules de commutation ».

C'est au niveau de celles-ci que l'on introduit les notions de commutation « dure » et de commutations « douce » et « adoucie ».

### I.1.2 Commutation dure

La commutation dure, également appelée commutation forcée, résulte de l'emploi d'un composant commandé à l'ouverture et à la fermeture. Les contraintes importantes qui sont alors imposées à celui-ci dépendent fortement des inductances de connexion et de câblage et de diverses capacités parasites, ce qui entraîne :

- des pertes élevées ;
- des surtensions et des surintensités aux bornes de l'interrupteur ;
- de rapides variations de tension et courant (dv/dt et di/dt) ;
- de fortes oscillations, en particulier pour le découpage à haute fréquence.

Pour limiter ces effets, on peut associer aux semi-conducteurs des circuits d'aide à la commutation (CALC), dont le rôle essentiel est de réduire les pertes correspondantes et de limiter les surtensions et/ou surintensités.

### I.1.3 Commutation douce

En commutation naturelle ou douce, les interrupteurs présentent une commutation commandée et une commutation spontanée.

Il est possible de regrouper ces convertisseurs en deux familles :

- la première correspond à des commutations pilotées par les grandeurs d'état de nature électrique. Il s'agit par exemple de certains convertisseurs reliés au réseau alternatif. C'est également le cas des convertisseurs quasirésonnants qui utilisent un couple de composants passifs L-C pour provoquer l'annulation du courant ou de la tension.
- la seconde est relative aux structures pour lesquelles les commutations spontanées des interrupteurs sont obtenues consécutivement à la commutation d'autres interrupteurs, c'est le cas pour les hacheurs de puissance à un thyristor principal dont l'extinction est assurée par un circuit auxiliaire de nature oscillante comprenant un deuxième thyristor dit de soufflage.

### I.1.4 Commutation adoucie

La commutation est adoucie par l'emploi de CALC associés aux composants, dont les deux mécanismes essentiels consistent à :

- ralentir la montée en courant à la fermeture par adjonction en série d'une inductance avec l'interrupteur ;
- ralentir la croissance de sa tension aux bornes par mise en parallèle d'un condensateur.

Avec un CALC, le composant est à même de commuter la totalité du courant alors que la tension à ses bornes reste encore faible ou, par dualité, supporter la totalité de la tension, le courant étant annulé. A noter pour les puristes qu'on ne peut théoriquement pas parler de commutation à zéro de courant (ZCS) ou zéro de tension (ZVS) car ces grandeurs ne font qu'évoluer différemment tout au long de la commutation et ne sont jamais totalement nulles.

L'association de ces éléments passifs a bien entendu ses revers, comme le risque de surtension due à l'inductance à l'ouverture, et de surintensité due au condensateur à la fermeture, ou encore celui de la génération d'oscillations indésirables. Un CALC est en conséquence un circuit plus complexe incluant d'autres éléments comme par exemple une résistance pour dissiper l'énergie liée aux oscillations ainsi que des diodes pour assurer les connexions unidirectionnelles indispensables.

La figure I.1 présente un CALC dissipatif opérationnel à l'ouverture et la fermeture.

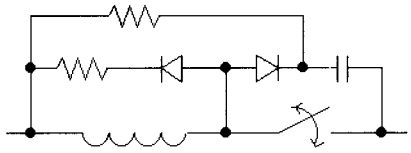


*Figure I.1 : CALC dissipatif*

Pour les petites puissances, des CALC plus élaborés peuvent être mis en œuvre. Ils se composent généralement de condensateurs, d'inductances et d'un autre interrupteur. La commande de ce dernier permet de réaliser une oscillation locale qui provoque la commutation du composant principal au « zéro de tension » ou « zéro de courant ». Ce sont les techniques ZVS et ZCS évoquées précédemment.

En conclusion, les CALC améliorent les commutations puisque les surtensions et surintensités sont réduites au niveau de l'interrupteur qui ne supporte plus seul les différents traumatismes. Cependant, on ne supprime pas les variations rapides de courant et de tension (di/dt et dv/dt) qui sont en fait reportées sur les composants réactifs des CALC, ce qui peut augmenter les probabilités de rayonnement indésirable, en particulier en champ magnétique, par les éléments bobinés. Il faut encore souligner que le renvoi éventuel à la source de l'énergie de commutation ainsi que celle des oscillations parasites peut réduire la qualité du signal en amont.

## I.2 Convertisseurs et composants associés

Ce paragraphe est une présentation sommaire des différents convertisseurs, qui a pour objectif principal de rappeler quels sont les semi-conducteurs associés, et les perturbations essentielles qui les caractérisent.

### I.2.1 Convertisseurs à la fréquence réseau

Il s'agit essentiellement des redresseurs commandés, des gradateurs et des cyclo-convertisseurs.

Ces structures traditionnelles sont réalisées dans une très large plage de puissance, elles utilisent essentiellement des thyristors commandés par la phase. Les commutations à l'ouverture des composants sont spontanées. Les vitesses de commutation sont peu élevées car limitées par la nature des sources et les caractéristiques des composants.



Extrait de la publication

Les principales perturbations observées concernent essentiellement les harmoniques et sous-harmoniques des courants prélevés au réseau. Le rayonnement à proximité immédiate de ces structures peut être élevé, compte tenu des amplitudes très fortes des tensions et courants mis en jeu, mais la fréquence de découpage étant très basse, les champs décroissent très vite avec l'éloignement. On s'intéressera alors en CEM, essentiellement aux champs dits « proches ».

### I.2.2 Convertisseurs à fréquence industrielle (< 16 kHz)

Il s'agit essentiellement des hacheurs de puissance utilisés par exemple dans les variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu et des onduleurs destinés aux moteurs alternatifs, ou encore aux alimentations statiques de secours.

#### I.2.2.1 Les hacheurs de puissance

Les sources amont et aval sont de nature continue ce qui n'autorise pas bien sûr la commutation spontanée des interrupteurs employés. Ceux-ci sont donc commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les commutations génèrent alors des gradients de courant et de tension importants dans les différentes connexions du convertisseur.

Les composants utilisés en très forte puissance sont des thyristors avec circuit de soufflage, ou des GTO (thyristors blocables par la commande). En moyenne puissance, le transistor IGBT est préféré.

Les perturbations conduites couvrent un spectre plus étendu que précédemment, puisque les fréquences de découpage choisies peuvent atteindre 16 kHz dans un souci de réduction des bruits acoustiques.

Les vitesses de commutation sont encore peu élevées car toujours limitées par la nature des sources et les caractéristiques des composants.

Les champs proches, du fait des amplitudes élevées des tensions et des courants, seront importants et avec un spectre un peu plus étendu en fréquence (pouvant atteindre quelques MHz) que pour les convertisseurs précédents.

#### I.2.2.2 Les onduleurs

Les onduleurs ont une structure en pont ou demi-pont et peuvent être regroupés selon trois familles : les onduleurs de tension, les onduleurs de courant et les onduleurs à résonance (résonance série ou résonance parallèle).

Les deux premières familles utilisent une commande à modulation de largeur d'impulsion (M.L.I.) unipolaire ou bipolaire ou génèrent des niveaux discrédités (marches d'escalier). Chaque commande a pour objectif la réduction des harmoniques de tension ou de courant aux basses fréquences.

Les onduleurs à résonance sont sur charge réactive, ils utilisent un élément dual en série ou parallèle pour créer ainsi une source réceptrice oscillante, dont les passages à zéro des grandeurs électriques autoriseront les commutations naturelles. Les courants et tensions obtenus sont d'allures sinusoïdales. Les fréquences de fonctionnement doivent être proches de la fréquence d'oscillation du dipôle LC pour limiter leurs harmoniques.



Extrait de la publication

Les onduleurs nécessitent généralement des interrupteurs bidirectionnels en tension ou en courant, entièrement commandés (GTO, IGBT ou transistors MOS associés à une diode). Les commutations peuvent avoir lieu plusieurs fois par période et être irrégulièrement réparties (commande à M.L.I.). C'est alors une séquence qui se répète à la fréquence de fonctionnement. Il est ainsi difficile de parler de fréquence de commutation pour ces composants. On peut toutefois introduire la notion de « motif ».

Les perturbations conduites sont observables sur l'entrée continue et sont directement liées aux découpage des ondes réalisant la sortie alternative.

Le rayonnement à proximité dépendra de la puissance mais aussi du type des composants, puisque leur vitesse de commutation peut être, comme nous le verrons ensuite, nettement supérieure dans le cas des MOS ou de certains IGBT de dernière génération.

### I.2.3 Convertisseurs à fréquence élevée (30 kHz - 100 kHz)

L'utilisation de fréquences de fonctionnement élevées permet de s'affranchir des bruits acoustiques, de diminuer la taille des condensateurs, des inductances, des transformateurs et de faciliter le filtrage. Cependant, les composants capables de fonctionner à ces fréquences admettent des limites en courant et tension restreintes. Ces convertisseurs sont donc principalement utilisés en moyenne et petite puissance.

Les alimentations à découpage constituent l'essentiel de cette famille, elles assurent principalement la conversion continu-continu et alternatif-continu (ajout d'un pont redresseur en tête). Techniquement, ces structures du type « hacheur », relient des sources de nature différente (hacheur sans accumulation) ou identique (hacheur à stockage intermédiaire).

Les composants les plus employés sont les transistors MOS de puissance, les transistors bipolaires et les IGBT rapides. Les vitesses de commutation sont imposées soit par le composant soit par le CALC. En règle générale, les temps de commutation sont réduits au maximum pour conserver au convertisseur la meilleure dynamique possible et de ce fait le rayonnement électromagnétique peut être important. Sa réduction est possible dans les cas particuliers des alimentations « quasirésonnantes » ou « résonnantes ».

### I.2.4 Caractéristiques des SC de puissance associés aux convertisseurs

Dans cet ouvrage, nous nous limitons aux semi-conducteurs (SC) destinés aux petites et moyennes puissances et cherchons essentiellement les caractéristiques concernant leurs commutations et, plus particulièrement, celles qui déterminent les variations rapides du courant.

Les caractéristiques fournies par les constructeurs sont variées, elles donnent généralement un aperçu des performances optimales du composant. Les tests sont en effet réalisés avec des circuits particuliers qui sont pour la plupart exempts des éléments parasites que l'on peut trouver sur des cartes industrielles (inductances de ligne, capacités entres pistes, éléments parasites d'autres composants...).



Extrait de la publication

Compte tenu de cela, certaines valeurs relevables sur des montages industriels pourraient être beaucoup plus importantes que les niveaux proposés.

Les caractéristiques présentées ci-après pour les différents composants signalés précédemment ont été prelevées dans différents recueils de constructeurs connus. Nous y avons sélectionné des semi-conducteurs classiquement utilisés et, pour chaque famille, des caractéristiques types, moyennées, en vue d'établir à terme une forme d'onde de référence du courant commuté.

I.2.4.1 Le thyristor ou SCR

Le thyristor (Silicon Controlled Rectifier) est un composant relativement lent, bien adapté pour des fonctionnements aux basses fréquences en forte puissance. C'est un composant unidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension, dont la fermeture est commandée, alors que l'ouverture est spontanée au zéro de courant (figure I.2).

*Figure I.2 : Thyristor*

Le tableau I.1 ci-dessous, accompagné de sa légende (figure I.3), présente quelques caractéristiques sélectionnées de thyristors de différentes gammes.

| $V_{AK}$ (V) | $I_{rms}$ (A) | di/dt max (A/µs) | $t_r$ min (µs) | $t_q$ (µs) | dv/dtd max (V/µs) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 300 | 630 | 200 | 5,5 | 25 | 500 |
| 400-1 400 | 450 | 300 | 2,6 | 30 | 500 |
| 500-800 | 25 | 200 | 0,2 | 70 | 500 |
| 800-1 200 | 25 | 500 | 0,1 | 60 | 1 000 |
| 800-1 400 | 69 | 500 | 0,2 | 100 | 1 000 |

*Tableau I.1 : Caractéristiques sélectionnées de quelques thyristors*



Extrait de la publication

Légende :

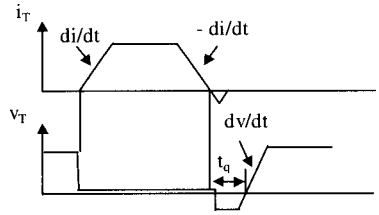



*Figure I.3 : Ondes du thyristor*

- $t_r$ (min) : temps minimum estimé pour atteindre le niveau $\sqrt{3}$ Irms(max) ;
- di/dt : vitesse maximale de croissance et de décroissance du courant ;
- $t_q$ : temps de blocage du thyristor. C'est le temps minimum entre le passage à zéro du courant dans le sens direct et la montée de la tension directe sans remise en conduction du thyristor ;
- dv/dt : vitesse maximale de croissance de la tension directe du thyristor. Au-delà de cette valeur, il y a risque d'amorçage intempestif du thyristor.

Nous proposons de retenir des ordres de grandeur qui permettront par la suite de définir l'onde type de courant. A noter que la puissance commutée n'atteint pas le maximum possible pour le thyristor, du fait que nous souhaitons pouvoir comparer les différents semi-conducteurs dans une plage de puissance commune.

- temps de commutation à la fermeture : 0,1 µs à quelques µs ;
- di/dt : 30 A/µs à 170 A/µs (200 à 1 000 A/µs en non répétitif).

I.2.4.2 Le thyristor GTO

Le GTO (Gate Turn Off), est très utilisé dans le domaine des fortes puissances (figure I.4). La fermeture et l'ouverture sont commandées.

*Figure I.4 : GTO*

Quelques caractéristiques sélectionnées de thyristors GTO sont données dans le tableau I.2.



Extrait de la publication

# BIBLIOGRAPHIE

J.-L. Cocquerelle, « CEM et électronique de puissance », Ed. Technip, collection Sciences et Technologies, Paris, 1999. ISBN 2-7108-0764-5 ISSN 1243-0226.

C. Pasquier, P. Levron, J.-L. Cocquerelle, « Fields radiation of an elementary power electronic converter » 8th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'99, Lausanne, Switzerland, 7 - 9 Sep. 99 (CDROM édité).

C. Pasquier, P. Levron, J.-L. Cocquerelle, « Simplified model of a 2D power converter "topological" loop, elaborated in order to take into account geometrical design and skin effect », 5th International Symposium on Electric and Magnetic Fields EMF 2000, Gand, 17-19 May 2000.

C. Pasquier, P. Levron, J.-L. Cocquerelle, « Fast calculation method of the near field radiated by a power converter loop in order to optimise the position of the associated sensitive card », International Conference on Power Conversion, Intelligent Motion, Power Quality, PCIM 2000, Nuremberg June 6-8, 2000, Power Conversion proceedings pp 41 - 46.

P. Levron, C. Pasquier, G. Perpera, J.-L. Cocquerelle, « EMI-RFI Mains Filters Modelling and Simulation in order to estimate the probability of trouble due to the realistic impedances of mains and load », 6th International Conference ELECTRIMACS 99, 14 - 16 Sep. 99, Vol. 3, pp. III-189 - III-193.

P. Levron, C. Pasquier, J.-L. Cocquerelle, « Difficultés de mesures d'émissions conduites selon la CISPR 25 », IV$^{e}$ congrès sur la compatibilité électromagnétique CEM Expo 99, Paris 13 et 14 Oct. 1999.

C. Pasquier, P. Levron, J.-L. Cocquerelle, « Reduction of the self-disturbance of a power converter due to magnetic field effects. Research of the optimal control card orientation », 5th International Symposium on Electric and Magnetic Fields EMF 2000, Gand, 17-19 May 2000.

J.-L. Cocquerelle, C. Pasquier, « CEM et électronique de puissance », Journées Technologiques : Stratégies de dépollution harmonique des réseaux électriques, 27-28 avril 2000, Saint Nazaire, Département Génie Electrique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, p. 215-222.

C. Pasquier, M. Ameziani, J.-L. Cocquerelle, « Compatibilité électromagnétique (CEM) en électronique de puissance », colloque sur l'enseignement des technologies et des sciences de l'information et des systèmes en électronique, électrotechnique et automatique, CETSIS-EEA'99, 4 et 5 novembre 1999, université Montpellier II, Ed. Cépaduès, Toulouse, p. 265-268, ISBN 2.85428.515.8.

C. Pasquier, J.-L. Cocquerelle, « Rayonnement en champ proche des boucles "topologiques" des convertisseurs de l'électronique de puissance », colloque électronique de puissance du futur EPF 2000, 29 et 30 Novembre et 1er Décembre 2000, Lille.

P. Levron, C. Pasquier, P. Lambert, J.-L. Cocquerelle, « Aspect de la pollution des réseaux en continu des navires de plaisance par les convertisseurs de puissance. Choix de la structure la moins polluante », Troisième symposium international sur le navire tout électrique civil ou militaire, AES 2000 (All Electric ship), Paris, 26 et 27 octobre 2000.



Extrait de la publication